터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제17권 제2호, 2007년 4월, pp. 152~164

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 17, No. 2, 2007, pp. 152-164
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

문화재로 지정된 무라이닝 암반터널 하부통과 설계사례

김선홍[1)*], 정동호[2)], 석진호[3)], 박명렬[4)]

A Case Design of a Tunnel Passing Under an Adjacent Unlined Tunnel Designated As a Cultural Property

Seon Hong Kim, Dong Ho Jeong, Jin Ho Seok and Myoung Lyul Park

Abstract Recently as increasing the amounts of cargoes and passengers, it is necessary to improving railway capacity and speed. So the constructions of improving the existing railway line have been advanced. Sometimes the new railway tunnel is built to adjacent the existing railway line. Furthermore the new tunnel might be built near the existing facility within the tunnel width. In this case, it should be analyzed the influence of existing tunnel and if it is necessary, it should be taken the appropriate counterplan. The major analysis contents are follows. One is the influence on the existing tunnel by a blasting and train vibration and the other is stability problem of the existing tunnel by excavation of new tunnel. Therefore, we performed the following analysis. Refer to a domestic and foreign standard and paper, the permitting level of blasting vibration is decided and the excavation plan of the new tunnel are designed. The numerical analysis is performed about the stability of the existing tunnel and new tunnel. The influence of the train vibration on tunnel is analyzed by the empirical equation.

Key words Permitting level of blasting vibration, Train vibration, Existing tunnel

초 록 근래 철도를 이용한 물동량과 여객의 증가로 인하여 선로용량을 증대시키고 운영철도의 고속화를 추진하면서 기존 철도노반을 개량하는 건설공사가 많이 진행되고 있다. 이와 관련하여 기존노반과 인접하여 터널공사가 진행되는 경우가 종종 있으며 경우에 따라서는 터널폭 이내로 기존시설물과 근접되어 터널이 계획되는 경우도 있다. 공용중인 터널에 근접하여 터널을 계획하는 경우에는 기존터널에 미치는 영향을 검토하고 필요시 대책을 강구하여야 한다. 설계시 주요 검토사항으로는 시공시의 발파진동으로 인한 기존터널에 미치는 영향, 근접굴착으로 인한 기존터널의 안정성 확보 여부, 운행시 열차진동에 대한 영향분석으로 구분할 수 있다. 본고에서는 기존터널의 특성을 고려하여 국내외 기준 및 문헌을 통한 허용발파진동 선정 및 굴착계획 수립, 수치해석에 의한 안정성 분석, 경험식에 의한 열차진동의 영향 분석을 수행하였다.

핵심어 허용발파진동, 열차진동, 기존터널

1. 서 론

본 설계사례는 1920년대 건설된 폭 4.7 m, 높이 7 m의 기존 재래식 무라이닝(unlined) 도로터널의 하부를 통과하도록 계획된 OO철도터널의 설계시 검토된 내용으로서 기존터널에 대한 허용발파진동 선정, 안정성 분석, 열차진동의 영향 등을 검토한 사례이다.

특히 본 설계구간의 기존 도로터널은 일제시대에 주민들이 강제 동원되어 인력굴착 되었고 해방 후에도 많은 사건이 발생하여 역사적으로 의미가 있는 터널이므로 2004년 12월 등록문화재로 지정되어 관할 지방자치단체에서 지역문화재로 관리하는 터널이다.

[1)] (주)유신코퍼레이션 터널부 상무
[2)] (주)유신코퍼레이션 터널부 상무
[3)] (주)유신코퍼레이션 터널부 차장
[4)] (주)유신코퍼레이션 터널부 과장
* 교신저자 : shkim85@empal.com
접수일 : 2007년 4월 6일
심사 완료일 : 2007년 4월 23일

2. 현황분석

OO터널은 전라선 여천~여수간 철도개량 건설공사 구간의 종점부인 여수정거장과 인접하여 위치하며 총 연장이 1,968 m로서 단선 및 복선터널로 계획되었다.

본 OO터널은 설계·시공 일괄입찰 발주방식으로 2003년에 설계완료 되어 시공 준비단계에 있었으나 2012년 여수 해양엑스포 유치계획에 의해 여수정거장의 위치가 변경됨으로써 터널구간의 곡선반경(R)이 1,200 m에서 800 m로 변경되어 변경설계를 수행한 터널이다.

2003년 설계완료 당시에는 무라이닝의 도로터널이 문화재로 지정되기 전이여서 국내·외 허용발파진동 기준과 시공사례 등을 분석하여 진동기준을 3.0 cm/sec로 적용하여 굴착계획을 수립하였다. 그러나 변경설계 시에는 문화재로 지정됨에 따라 기 적용된 진동기준인 3.0 cm/sec의 적정성에 대하여 관할 지방자치단체 및 문화재 자문위원과 협의를 거쳐 터널안정성을 확보할 수 있는 적정 굴착계획을 수립하였다.

그림 1은 OO터널의 노선현황과 주요지점의 근접현황을 보여준다. OO터널의 좌측으로 기존 전라선 단선 철도터널이 14 m에서 70 m로 이격되어 위치하며 우측에는 여수국도대체우회도로가 시공중에 있다. 또한 문화재로 지정된 무라이닝 암반도로터널이 OO터널의 상

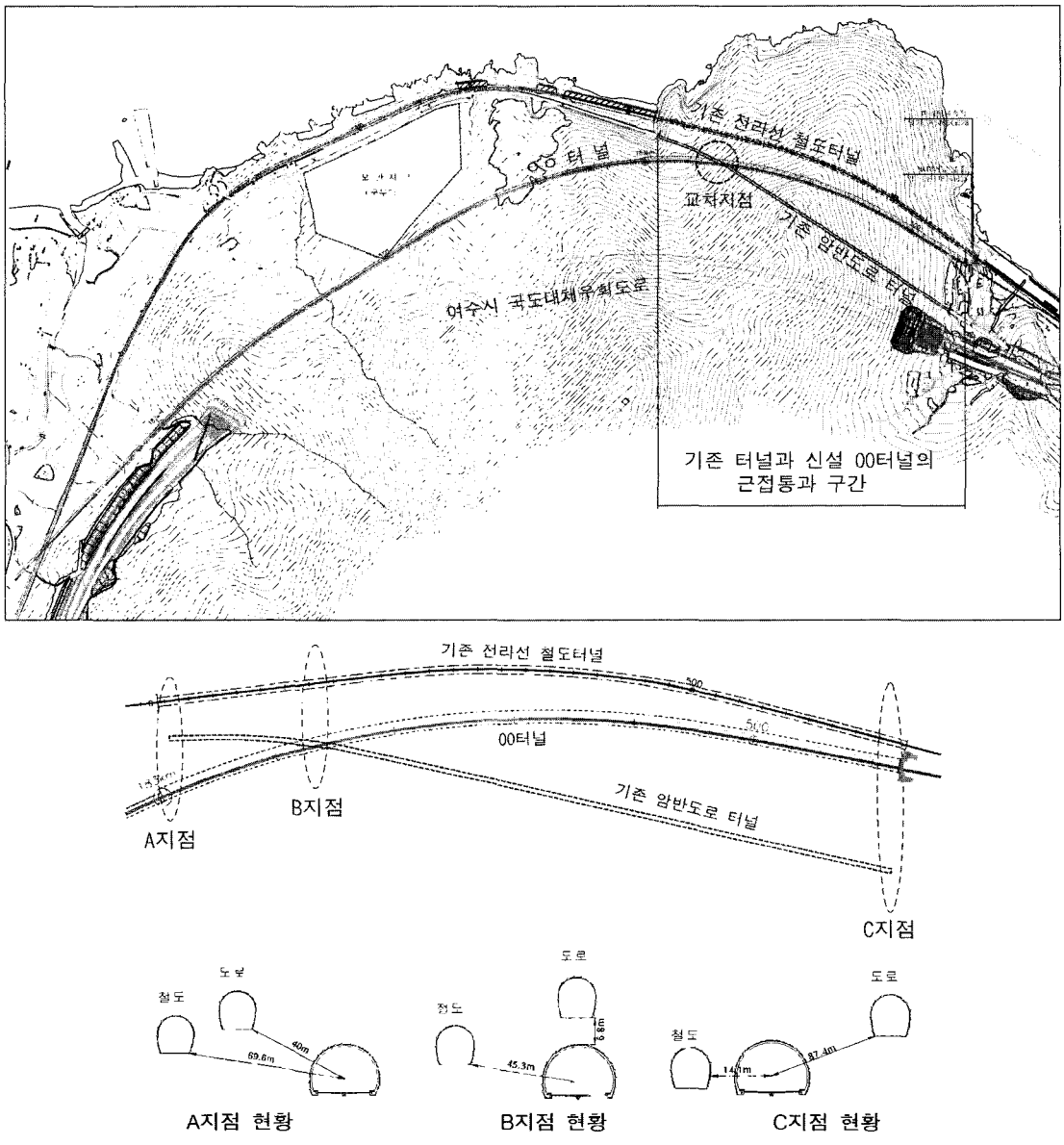


그림 1. 노선 및 터널 근접현황

부에 6.8 m이격되어 교차 통과한다.

터널구간의 기반암은 안산암이고 터널은 암반이 노출되어 있는 해안가에 위치하며 노선 좌측의 산자락부는 바다와 접해있다. 특히 기존 터널과 근접된 구간의 지반조건은 경암반으로 암반등급은 I 등급이며 신설되는 OO터널의 지층두께는 80 m 정도이다.

3. 굴착공법 계획

3.1 기존 암반터널에 대한 발파허용기준

OO터널의 굴착계획을 수립하기 위해서는 문화재로 지정된 기존 암반터널의 안정성을 확보하기 위한 허용 발파진동치를 설정하여야 한다. 문화재 기준인 0.2 cm/sec를 적용할 경우 신설되는 OO터널의 600 m 이상을 무진동으로 굴착하여야 한다.

즉, 지상의 건축물, 성벽, 고분, 암반터널 등과 같이 문화재의 종류에 따른 특성을 고려하지 않고 동일한 문화재 기준인 0.2 cm/sec를 적용하면 공사비가 과다하게 소요된다.

특히 지하에 건설된 암반터널의 경우는 콘크리트 구조물에 비하여 진동으로 인한 안전성이 상대적으로 높으며 암반내 절리 및 불연속면의 거동과 낙반의 발생 가능성이 더 중요한 사항이다.

국내·외 발파진동 기준은 일반적으로 콘크리트구조물에 대한 손상기준이며 암반터널에 대한 구체적인 발파허용기준은 제시된 예가 거의 없는 실정이다. 스웨덴의 경우 지반의 종류에 따라 발파진동기준을 달리 설정하고 있는데 Persson 등(1980)이 보고한 허용 수준에서는 경암에 기초한 건축물이 아닌 구조물에 대해서 철근 콘크리트 벙커는 20 cm/sec, 지하 암반동굴 천정(경암, 터널폭 15~18 m)은 7~10 cm/sec의 수준을 설정하고 있다[1].

본 사례에서는 문화재로 지정된 암반터널의 발파진동 허용기준을 선정하기 위하여 국내·외 허용기준과 문헌을 참조하였다. 대상물이 경암반에 존재하는 터널이므로 발파진동에 대한 저항성을 고려할 때 콘크리트 건축물에 대한 발파진동허용기준을 적용하기에는 다소 부적절한 면이 있지만 발파진동이 암반내 절리에 미치는 영향과 대상물이 문화재로 지정된 사실을 고려하여 건설교통부 제정 터널설계기준에 제시된 철근콘크리트의 중소형 건축물 손상기준인 3.0 cm/sec를 허용진동치로 적용하였다.

3.1.1 국내 발파진동기준

국내·외 발파진동기준과 시공사례를 살펴보면 국내의 경우는 표 1과 같이 일반적으로 문화재의 경우는 0.2 cm/sec이며 철근콘크리트 구조물의 경우는 1~5 cm/sec를 허용기준으로 제시하고 있다.

3.1.2 국외 발파진동기준

미국, 독일, 스위스의 발파진동기준을 살펴보면 각각 표 2, 표 3, 표 4에 수록된 바와 같이 주파수대역에 따라 기준 진동속도가 다소 차이는 있지만 대체로 상업용 건물, 철근콘크리트 구조물에 3~5 cm/sec의 진동기준을 제시하고 있다.

중국은 표 5와 같이 다소 높은 진동허용기준을 제시하고 있으며 수로터널은 10 cm/sec, 교통터널은 15 cm/sec,

표 1. 국내 공공기관별 발파진동허용기준[2-5]

구 분	구조물 종류	허용 진동치 (cm/sec)
터널설계기준 및 터널표준시방서 (건설교통부, 1999)	진동예민 구조물 (문화재 등)	0.3
	조적식벽체와 목재 천장구조물 (재래가옥 등)	1.0
	조적식 중소형건축물 (저층양옥, 연립주택 등)	2.0
	철근콘크리트 중소형건축물 (중, 저층 아파트 등)	3.0
	철근콘크리트 대형건축물(고층아파트 등)	5.0
암발파 설계요령 (건설교통부, 2003)	가축	0.1
	진동예민 구조물 (문화재 등)	0.2
	주택, 아파트	0.3~0.5
	철근콘크리트 구조물 및 공장	1.0~5.0
터널공사 표준안전작업지침 (노동부고시 94~26호)	문화재, 컴퓨터 등 정밀기기	0.2
	결함 또는 균열이 있는 건물	0.5
	균열이 있고 결함 없는 빌딩	1.0
	회벽이 없는 공업용 콘크리트 구조물	1.0~4.0

표 2. 미국 USBM (광무국) 허용진동기준, 1980[6]

구조물 구분	진동속도 (in/sec)	
	< 40 Hz	> 40 Hz
현대 콘크리트 가옥 및 구조물 (Drywall interior)	0.75 (1.9 cm/sec)	2 (5.08 cm/sec)
재래식 가옥 및 구조물 (Plaster on wood for interior walls)	0.5 (1.27 cm/sec)	2 (5.08 cm/sec)

표 3. 독일의 충격진동 (Short-term vibration)에 의한 건물피해 기준, 1986[7]

구조물 구분	진동속도(cm/sec)			
	건물바닥			건물옥상
	< 10 Hz	10-50 Hz	50-100 Hz	모든 주파수
상업용, 산업용 건물 및 이와 유사한 건물	2.0	2~4	4~5	4
주거용 및 이와 유사한 건물	0.5	0.5~1.5	1.5~2	1.5
진동에 취약한 건물 (문화재 및 기타 중요건물)	0.3	0.3~0.8	0.8~1	0.8

표 4. 스위스의 진동허용기준[8]

구조물 구분	주파수대역 (Hz)	발파진동에 대한 허용수준 (cm/sec)	교통 또는 기계진동에 대한 허용수준 (cm/sec)
공장, 교각, 철탑, 지하터널과 같은 철골 또는 철근콘크리트 구조물	10~60	3	1.2
	60~90	3~4	1.2~1.8

표 5. 중국 폭파안전규정의 터널에 대한 허용기준 (중국 폭파안전규정, GB 6722-86)[9]

구조물 구분	진동속도 (cm/sec)
수로터널	10
교통터널	15
광산갱도	10~30

광산갱도는 10~30 cm/sec로 허용진동을 규정하고 있다.

또한 미국 교통국에서 제시하고 있는 양생 콘크리트의 진동허용기준을 살펴보면 표 6과 같이 10일 이상 경과된 후에는 25.4 cm/sec까지 진동을 허용하고 있다.

표 6. 미국교통국의 양생콘크리트에 대한 허용진동수준 지침, 1991[9]

타설 후 경과시간	진동속도 (cm/sec)
0~4 시간	5.08
4~24시간	0.63
1~3일	2.54
3~7일	5.08
7~10일	12.7
10일 이상	25.4

3.1.3 근접발파 시공사례

콘크리트라이닝의 근접 발파시공사례를 살펴보면 국내의 경우는 경부선 청도~삼랑진간 선로개량 구간의 신도터널과 인접한 채석장 발파시 터널 콘크리트라이닝의 안전을 확보할 수 있는 적용기준을 2.5 cm/sec로 적용한 사례가 있다[9].

3.2 굴착계획

기존 암반터널의 안정성을 확보할 수 있는 굴착계획을 수립하기 위해서는 대상지반의 발파진동식을 결정하여야 한다. 본 검토에서는 원설계시 수행된 실규모 및 시추공시험발파 결과와 인접현장인 여수국도대체우회도로의 시공시 시행한 시험발파 결과를 참조하여 안전측 설계가 이루어지도록 계획하였으며 문화재 기준인 0.2 cm/sec와 본 설계시 적용한 3.0 cm/sec인 경우에 대하여 굴착 공사비를 검토하였다.

3.2.1 대상지반의 발파진동식 선정

적정 발파진동식을 선정하기 위하여 원설계시 수행한 실규모 시험발파, 시추공시험발파 결과 및 인근 도로현장의 실시공시 계측된 발파진동식을 표 7에 나타내었다.

표 8과 그림 2는 3가지 진동식의 이격거리별 진동속

도를 비교한 것으로 인근도로현장의 실제 시공중 작성된 진동식이 가장 높은 진동속도를 나타내며 시추공시험발파 결과와 유사한 양상을 보여준다. 따라서 본 설계시에는 시추공시험발파에 의한 진동식을 기준으로 굴착계획을 수립하였다.

3.2.2 허용진동치에 따른 공사비 분석

굴착방법은 허용발파진동치를 확보하기 어려운 구간에 대해서는 무진동 굴착을 적용하고, 발파굴착이 가능한 구간에 대해서는 허용진동치와 시공성을 고려하여 진동제어발파와 일반발파로 구분하여 적용하였다. 진동제어발파 및 일반발파패턴의 굴진장 및 지발당약량은 표 9와 같다. 본 검토구간은 경암반으로서 암반등급이 I 등급이고 1패턴이 주로 계획되어 있으므로 1패턴에 대해서 굴진장과 지발당약량을 3가지로 구분한 진동제어발파패턴을 계획하였다.

검토결과 그림 3과 같이, 허용기준 0.2 m/sec인 경우에 대해서 진동제어발파굴착이 가능한 이격거리는 59 m 이상, 일반발파굴착이 가능한 이격거리는 139 m 이상으로 나타났다. 3.0 cm/sec인 경우는 그림 4와 같이 이격거리가 15 m이상이 확보될 경우 진동제어발파굴착이 가능하고 39 m 이상 확보시 일반발파굴착이 가능하다.

표 7. 시험발파 비교

구 분	진동식	비 고
실규모 시험발파	$V = 416\ (D/W^{1/2})^{-1.85}$	
시추공 시험발파	$V = 1{,}209\ (D/W^{1/2})^{-2.0}$	적용
인근 현장 시공자료	$V = 887.89\ (D/W^{1/3})^{-1.8904}$	

표 8. 추정진동식에 의한 이격거리별 진동속도 비교

이격거리 (m)	지발당장약량 (kg)	진동속도 (cm/sec)		
		인접현장	시추공시험발파	실규모시험발파
10	0.563	7.957	6.807	3.454
15	0.563	3.697	3.025	1.631
20	0.563	2.146	1.702	0.958
25	0.563	1.408	1.089	0.634
30	0.563	0.997	0.756	0.453
35	0.563	0.745	0.556	0.340
40	0.563	0.579	0.425	0.266

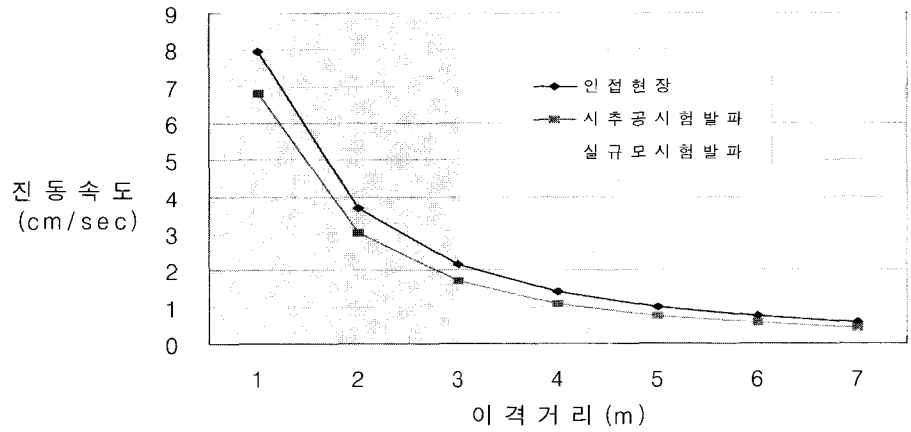


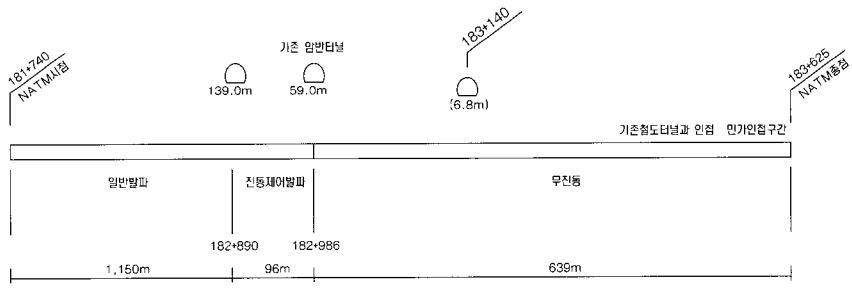
그림 2. 인접현장 및 실규모, 시추공 시험발파 결과 비교

표 9. 적용 발파패턴

구 분		진동제어발파			일반발파					
발파패턴		P 1-1	P 1-2	P 1-3	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6
굴진장 (m)		4.0	2.0	1.0	4.0	3.5	2.5	1.5	1.2	1.0
지발당 약량 (kg)	심발	3.0	1.5	0.5625	3.0	2.25	1.50	1.00	1.25	0.5
	확대	3.0	1.5	0.5625	9.0	6.188	4.50	2.625	1.313	1.50
비장약량 (kg/m^3)		1.07	1.04	0.95	1.06	0.90	0.84	0.78	0.77	0.80

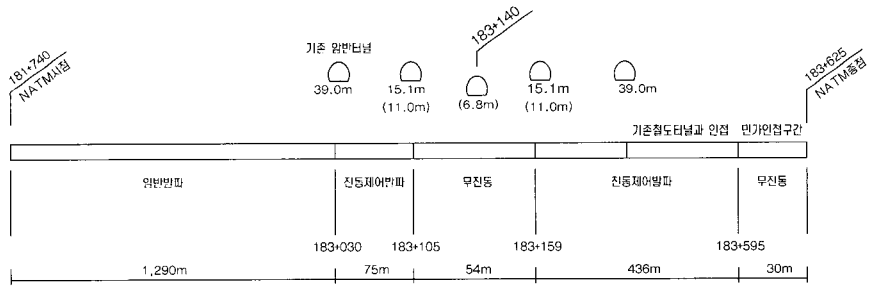
표 10. 허용진동기준별 굴착공사비 비교

구 분	무진동 굴착	제어발파굴착	일반발파	총연장 (NATM)	개략굴착공사비 (제잡비 53%)
0.2 cm/sec 기준	639 m	96 m	1,150 m	1,885 m	148.4억
	112.6억	2.8억	33.0억		
3.0 cm/sec 기준	84 m	511 m	1,290 m	1,885 m	67억
	14.8억	14.7억	37.1억		



( ) 속의 이격거리는 터널외측간 거리임.

그림 3. 0.2 cm/sec 기준시 굴착계획



( ) 속의 이격거리는 터널외측간 거리임.

그림 4. 3.0cm/sec 기준시 굴착계획

굴착계획을 토대로 굴착공사비를 비교하면 표 10과 같이 0.2 cm/sec를 기준으로 설정할 경우 639 m를 무진동굴착을 해야 하며 그에 따른 공사비는 148.4억원으로 3.0 cm/sec인 경우에 비하여 약 2.2배의 공사비가 소요된다.

3.2.3 적용진동치 및 굴착계획

상기의 검토결과와 같이 지장물이 근접되어 있을 경우 발파허용기준의 정도에 따라 많은 공사비의 차이가 발생하므로 지장물의 종류에 따라서 신중한 기준 적용이 필요하다.

본 설계에서는 국내·외 각종 기준과 허용진동치에 따른 공사비 검토결과를 바탕으로 암반터널의 허용진동기준을 3.0 cm/sec로 설정하였으며 무라이닝 암반터널의 안정성 확보와 시공성 및 경제성을 고려하여 이격거리에 따라서 무진동굴착, 진동제어발파, 일반발파로 구분하여 계획하였다. 또한 암반등급이 I 등급인 교차구간의 지보패턴을 1 단계 하향조정하여 적용하였으며 시공전 기존터널의 절리 분포와 낙반가능성에 대한 정밀조사를 실시하고 시공 중에는 지속적인 계측 및 필요시 보강을 실시하며, 시공 후에는 정밀 안전진단을 실시하도록 계획하였다.

4. 굴착에 따른 터널안정성 검토

기존 터널과 OO터널이 교차하는 구간에서 터널 굴착시의 근접터널간의 변위 및 응력거동을 3차원 해석프로그램인 MIDAS/GTS를 이용하여 분석하였다.

4.1 해석단면 및 지보현황

해석위치로 설정한 구간은 가장 근접되어 무진동굴착으로 계획한 교차구간이다. 교차구간의 신설되는 OO터널 복선단면과 상부의 기존 도로터널의 단면은 그림 5와 같고 적용지보패턴은 표 11과 같이 2패턴을 적용하였으며 굴진장은 1.0 m이다.

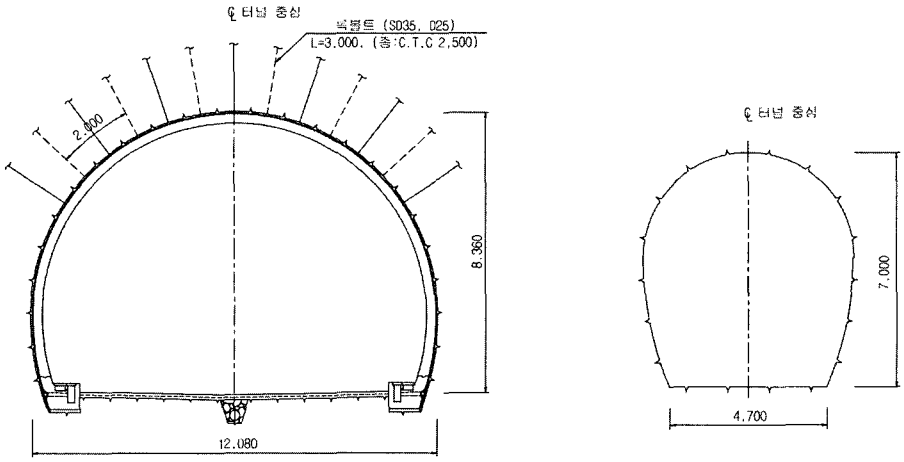


그림 5. 해석 터널단면

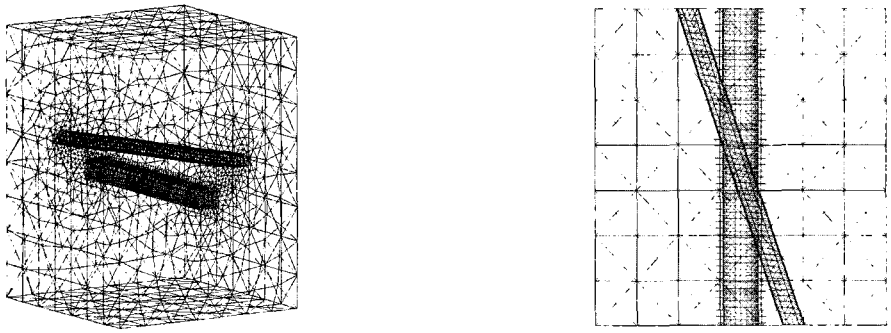


그림 6. 3차원 유한요소망 및 시공과정 모델링

표 11. 해석단면의 굴착 및 지보현황

구 분	RMR	굴착공법	굴진장 (m)	록볼트길이/간격 (m)	숏크리트두께 (cm)
복선터널 (P-2)	83~89	전단면굴착	1.0	3.0/2.0	5 (강섬유보강)
기존 터널	83~89	전단면굴착	-	무지보구간	무지보구간

4.2 해석 모델링 및 입력 물성치

본 해석 구간은 지층두께가 80 m로 형성된 대심도 구간으로서 굴착으로 인한 영향이 미치는 영역만을 모델링에 포함시키고 그 외의 지층은 상재하중으로 모델링하였다. 그림 6은 3차원 유한요소망 및 시공과정의 모델링 현황을 보여주며 적용한 1등급 경암반의 지반물성치는 표 12와 같이 원설계시와 동일한 값을 적용하였다.

해석은 지반의 초기응력조건을 설정한후 기존 터널을 굴착하고 신설되는 OO터널의 굴착 및 지보 시공순서로 수행하였다.

4.3 해석결과 및 분석

검토대상인 교차 구간의 지반조건이 매우 양호한 관계로, OO터널 굴착시 기존터널에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

터널의 변위 및 지보재 응력 발생현황은 표 13과 같으며 신설되는 OO터널에서의 최대천단변위는 0.76 mm, 내공변위는 최대 2.38 mm가 발생하였다.

숏크리트에 작용하는 최대 휨압축응력은 1.487 MPa (허용치 8.4 MPa)이고 록볼트 축력은 최대 24.8 kN으로서 허용치 이내이다.

OO터널의 굴착에 따른 기존 암반터널의 바닥변위는 표 14와 같이 교차지점인 측점 3위치에서 최대변위 -0.27 mm가 발생하였으며 교차지점을 기준으로 전·후방의 최종 바닥변위는 대칭적으로 유사한 결과를 보여주고 있다. 표 15는 시공단계에 따른 지보재에 발생하는 음력양상을 보여준다.

5. 완공 후 열차진동에 대한 영향 검토

5.1 검토조건

열차운행중 진동전파를 검토한 교차구간의 현황은 그림 7과 같다. 검토조건은 표 16과 같이 설계속도는 150 km/hr, 진동의 전파경로는 기반암이고 콘크리트라이닝 두께는 300 mm로서 실제조건과 동일하게 검토하였다.

5.2 열차진동 예측식

OO터널 내에 열차운행시 기존터널에 전달되는 열차

표 12. 지반 물성치

구 분	단위중량 (kN/m^3)	변형계수 (GPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)	포아송비 (ν)
I 등급 (경암)	26	17.7	5	44	0.19

표 13. 해석결과: 천단변위 [(-): ↓, (+): ↑] , 내공변위 [(+): 터널내측, (-): 터널외측]

구 분	최대천단변위 (mm)	최대내공변위 (mm)	숏크리트최대응력 (MPa)	록볼트최대축력 (kN)
OO터널	-0.76	2.38	1.487	24.8
	안정	안정	안정	안정
기존터널	-0.27	2.03	-	-
	안정	안정	안정	안정

표 14. 터널변위 현황

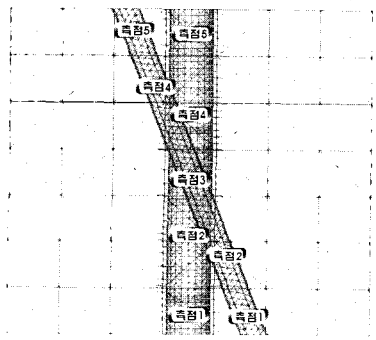
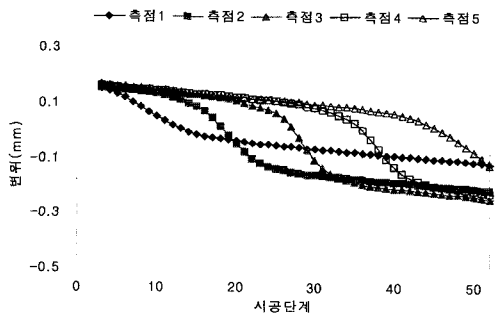
검 토 위 치	기존터널 바닥변위
	

표 14. 터널변위 현황 (subsequence)

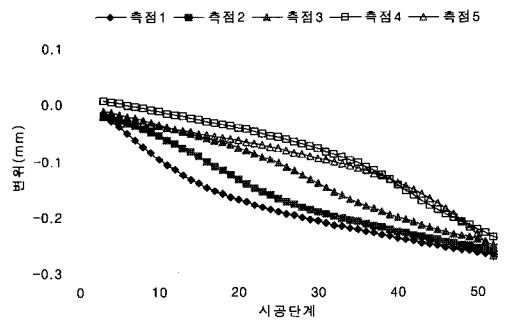
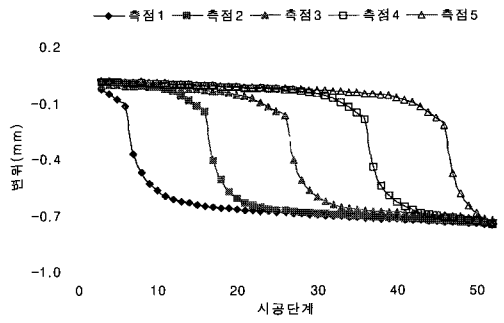
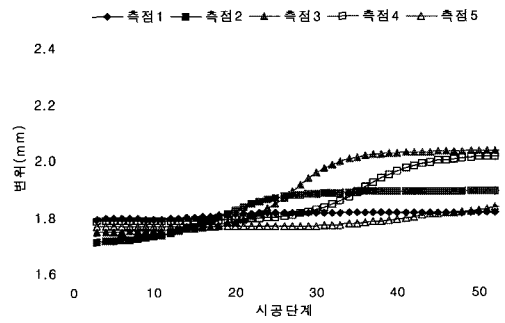
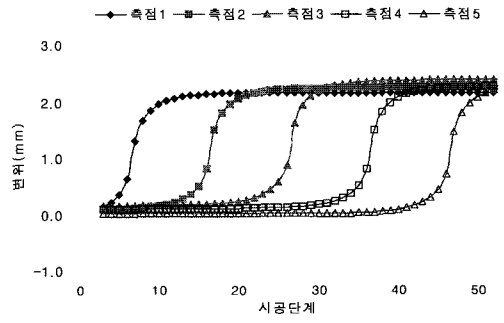
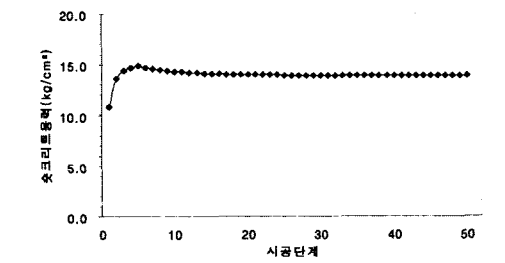
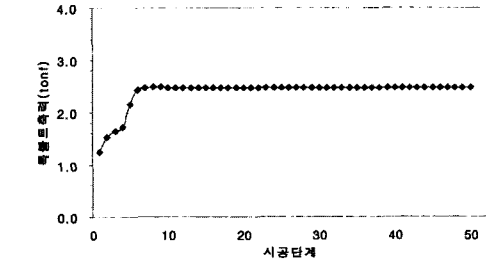
기존터널 천단변위	OO터널 천단변위
	
기존터널 내공변위	OO터널 내공변위
	

표 15. 본선굴착후 숏크리트응력 및 록볼트 최대축력

OO터널 숏크리트 휨압축 응력	OO터널 록볼트 축력
	

진동을 예측하기 위하여 이론식을 이용하여 검토하였다.

진동예측을 위한 이론식에는 뉴욕지하철 방법[10], Ungar와 Bender의 방법[10], Wilson의 방법[10]이 있으며 상기 방법들은 기본가정조건로부터 산정된 진동레벨을 터널형식, 궤도조건, 구조물 제원 등의 특성에 대하여 보정함으로써 최종 진동레벨을 예측한다. 본 고에서는 예측된 열차진동레벨을 발파진동속도와 비교하기 위하여 식 (1)을 이용하여 열차진동 레벨 단위인 dB(V)을 진동속도단위(cm/sec)로 환산하였다.

적용환산식[10]: $dB(V)=20\log V+71$ (1)

여기서 V는 진동속도(mm/sec)

5.2.1 뉴욕 지하철 방법

뉴욕지하철로부터 측정된 진동자료를 기초로 Kurzweil과 Ungar에 의해 제안된 진동예측 방법이다. 3가지 유형의 지반에서 거리에 따른 진동레벨 및 기본가정은 표 17과 같으며 진동레벨 보정항목 및 방법은 표 18과 같다.

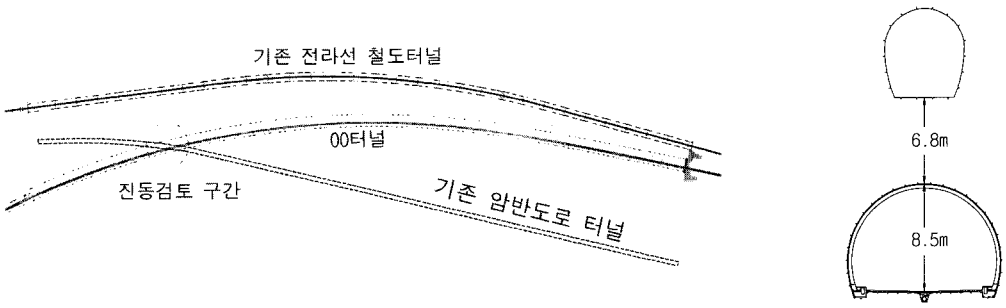


그림 7. 교차구간 현황

표 16. 검토조건

설계인자	설계속도 (km/hr)	터널구조	콘크리트라이닝 두께 (m)	전파경로
적용값	150	복선터널	0.3	기반암

표 17. 기본가정조건 및 진동레벨

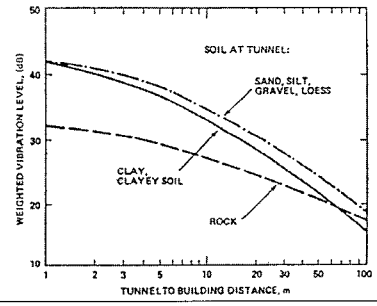
기준진동레벨의 가정조건		지반조건별 거리에 따른 진동레벨
터널	• 콘크리트 터널, 벽두께 (0.6m, 그라우팅포함)	
트랙	• 직결도상, K=3x10^7 N/m^2	
레일	• 용접레일, 표면상태 보통, 굴곡없음	
차량	• 바퀴상태 보통, 차량속도: 56 km/hr	
수진측 위치	• 조적식구조물의 지하실	

표 18. 진동레벨 보정항목 및 방법

진동레벨 보정			
1) 터널과 차량에 의한 보정	• 터널벽두께	• 40×log (0.6/t)	t (m): 벽두께
	• 레일지지 강성계수	• 5×log (K/3x10^7)	K단위: N/m^2
	• 차량속도	• 16.6×log (V/56)	V단위: km/hr
2) 수진측 구조물이 토사지반 위의 가벼운 구조물인 경우: +5 dB			
3) 수진측 구조물 위치에 따른 보정: 지하실인 경우 0 dB			

5.2.2 Ungar & Bender 방법

이 방법은 NYCTA(New York city Transit Authority), Paris Metro, TTC(Toronto Transit Commission)의 지하철에서 측정한 지하철 선로 바닥 진동으로부터 발생한 지하철 벽의 진동스펙트럼을 기초로 제안한 경험식으로서 최대진동을 예측한다.

Ungar & Bender 방법의 기본가정조건 및 진동레벨은 표 19와 같으며 진동레벨 보정항목 및 방법은 표 20과 같다.

5.2.3 Wilson의 방법

이 방법은 지반진동의 평균레벨이 아닌 상한값의 진동레벨을 예측하므로 진동영향을 엄격히 평가할 수 있으며 기본가정조건 및 진동 레벨은 표 21과 같으며 진동레벨 보정항목 및 방법은 표 22과 같다.

5.3 열차진동 예측결과

3가지 방법의 진동예측식에 의해 검토한 결과 표 23에서와 같이 Ungar와 Bender 방법에 의한 진동식이 61.8

표 19. 가정조건 및 진동레벨

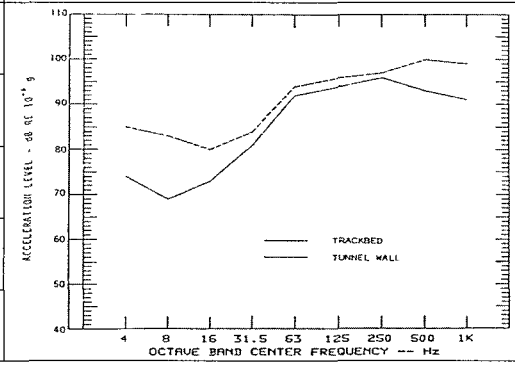
기준진동레벨의 가정조건		터널바닥과 터널벽에서의 기준진동레벨
열차	• 열차속도 56.4 km/hr	
궤도	• 강한체결조건	
	• 레일지지강성계수 K=138 MN/m^2	
	• 불연속레일	
진동원	• 터널로부터 수평으로 발산하는 주된 진동원은 터널벽으로부터 발생	

표 20. 진동레벨 보정항목 및 방법

진동레벨 보정	
1) 레일지지 강성계수	• 저주파 영역: 20 log (K/138)
	• 고주파 가청주파수 영역: 5 log (K/138)
2) 연속레일인 경우	• 저주파 영역: -5 dB
	• 고주파 영역: -10 dB
3) 속도보정	• 32~64 km/hr인 경우: 6~8 dB, 64 km/hr이상: 4 dB
4) 거리감쇠	• 기하학적감쇠: Ad (dB)=10 log(1+x/r_0) x: 터널벽에서 예측지점까지 거리, r_0: 터널중심에서 터널벽까지의 거리
	• 재료감쇠: Ad (dB)=27.3 fn/c • f: 주파수 (Hz), n: 무차원감쇠계수, c: 지반전파속도
5) 지반층 상황에 따른 보정	• A=20 log 1/2 (1+ρbcb/ρaca) ρa, ρb (밀도), ca, cb (압축파의 전파속도)
6) 암반위에 터널기초가 있을 경우의 보정: 흙을 관통하는 터널에 비하여 -20 dB	
7) 구조물과의 상호작용 영향에 대한 보정	

표 21. 가정조건 및 진동레벨

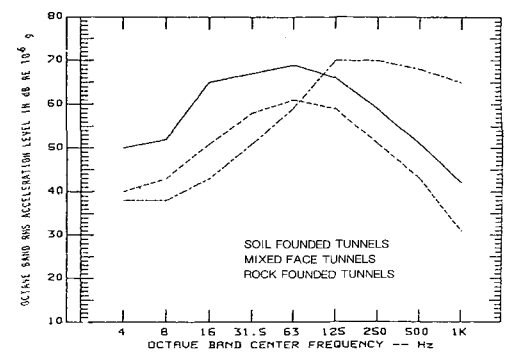
기준진동레벨의 가정조건		최대진동 기대치
터널형식	• Double Box 터널	
열차	• 열차속도 110~120 Km/hr, 8량	
궤도	• 레일지지강성계수 K=138 MN/m^2	
기준 진동레벨	• 표준탄성체결궤도	
	• 궤도중심으로부터 10 m 떨어진 곳의 수직진동 가속도레벨을 기준진동레벨로 정함.	

표 22. 진동레벨 보정항목 및 방법

진동레벨 보정	
1) 열차속도에 대한 보정	• ΔL (dB)=20 logV (열차속도)/V_0 (기준열차속도)
2) 궤도형식에 따른 보정	• RS-STEDEF와 슬라브궤도의 상대진동레벨 (제안값 이용)
3) 거리감쇠 보정	• 암반관통터널의 거리감쇠 (제안값 이용)
4) 구조물과의 상호작용 영향	• 구조물 유형별 진동감쇠 (제안값 이용)

표 23. 운행 중 진동예측치

구 분	뉴욕 지하철 방법	Ungar와 Bender의 방법	Wilson의 방법
예측결과 [dB (V)]	37.80	61.86	60.69
환산결과 (cm/sec)	0.002	0.03	0.03

※ 방진처리시: 방진침목패드+방진매트=5+10=15 dB 추가 저감 가능

dB(V)로서 가장 큰 진동치를 나타내며 61.8 dB(V)를 발파진동속도 단위인 cm/sec로 환산할 경우 0.03 cm/sec로서 매우 미소하다.

6. 결론 및 제언

근접통과 구간의 굴착계획을 위한 검토사항들은 노선 및 현장조건에 따라 다양하겠지만 본 설계사례와 같은 경암층의 양호한 지반조건에서 교차 통과되는 경우는 앞서 살펴본 바와 같이 암반터널의 허용발파진동, 근접터널의 굴착에 따른 안정성 여부, 완공 후 열차진동으로 인한 영향이 주요사항일 것이며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 무라이닝 암반터널은 지상에 축조되는 구조물과는 다르게 암반내에 건설된 지하구조물이고 지상구조물에 비해 상대적으로 진동에 대한 안전성이 매우 높다. 또한 각종 문헌들과 시공사례에서 살펴본 바와 같이 발파진동 2.5~3.0 cm/sec에서도 안전성이 확보될 것으로 판단되며 경제성, 시공성을 고려하여 허용진동기준을 3.0 cm/sec로 선정하였다.
2. 터널굴착에 따른 안정성 분석결과, 교차구간의 지반조건이 경암반으로 매우 양호하여 천단변위는 최대 -0.76 mm, 내공변위는 최대 2.38 mm로 미소한 변위가 발생하였으며 숏크리트 휨압축응력은 1.48 MPa, 록볼트 축력은 24 kN으로 허용기준을 만족하였다.
3. 완공 후 열차진동 영향은 진동예측식을 이용하여 검토하였으며 Ungar & Bender 방법으로 검토시 최대 61.86 dB(V)이 발생하였으며 이를 진동속도로 환산하면 0.03 cm/sec로 열차운행에 따른 진동의 영향은 거의 없는 것으로 검토되었다.

철도시설 계획시 인접지역의 편의성과 공사비를 고려하여 노선을 계획함에 따라 노선 주변으로 문화재를 포함한 다양한 지장물이 인접하는 경우가 있다. 국내의 경우 동일한 형태 및 조건의 지장물일지라도 문화재인 경우에는 일률적으로 발파진동허용기준을 0.2 cm/sec를 적용하고 있고 경우에 따라서는 허용기준을 준수하기 위해 노선의 변경이 필요한 경우도 있으며 시공 중에 문화재적인 가치가 있는 유물이 발견될 경우에는 공사를 중지해야 하는 것이 현실이다. 따라서 본 사례와 같이 문화재이나 안전도가 높은 암반터널이라면 적용기준을 달리하여 시공성과 경제성을 확보하는 것이 합리적이라고 판단된다. 향후에는 지상의 건축물, 성벽, 고분, 암반터널 등 문화재 종류 및 특성을 고려한 허용진동기준을 수립하여 경제적이고 합리적인 설계가 수행될 수 있기를 기대한다.

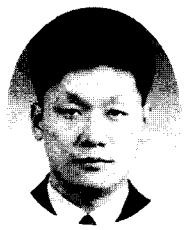
참고문헌

1. Persson, P.A. et al, 1980, Undergrou-nd blasting in a city, Subsurface Space, Proceed of the Int. Symp. (Rockstore '80), Stockholm, vol. 1, 199-206, Pergamon Press
2. 터널시방서, 1999, 건설교통부
3. 터널설계기준, 1999, 건설교통부
4. 암발파설계요령, 2003, 건설교통부
5. 터널공사표준안전작업지침 - NATM공법, (1994. 6.18) 노동부고시 제1994-25호
6. Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W. and Dowding, C.H., 1980, Structure Response and

Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, USBM RI 8507, 74p.
7. DIN 4150 Teil 3, 1986, Erchterungen im Bauwesen - Einwirkungen auf Bauliche Anlagen.
8. Swiss Association of Standardisation, 1978, Effects of vibration on construction, Seefeldstrasse 9, CH8008, Zurich
9. 류창하, 2001, "채석장 발파작업이 OO터널에 미치는 영향평가 용역", 한국지질자원연구원
10. 김응록, 2003, "철도진동의 예측에 관한 연구", 전남대학교 박사학위논문, pp. 14~15, pp. 74~102

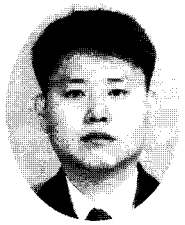
김 선 홍
1989년 한양대학교 자원공학과 공학사
1991년 한양대학교 자원공학과 공학석사
2003년 한양대학교 자원공학과 공학박사

Tel: 02-6202-0832
E-mail: shkim85@empal.com
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 상무



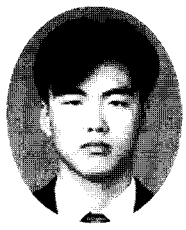
석 진 호
1993년 한양대학교 자원공학과 공학사

Tel: 02-6202-0837
E-mail: y11768@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 차장



정 동 호
1984년 강원대학교 자원공학과 공학사
1987년 강원대학교 자원공학과 공학석사
1995년 강원대학교 자원공학과 공학박사

Tel: 02-6202-0833
E-mail: jdh@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 상무



박 명 렬
1999년 경북대학교 토목공학과 공학사
2001년 경북대학교 토목공학과 공학석사

Tel: 02-6202-0839
E-mail: y12791@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 과장